第 37 卷第 5 期 2017 年 3 月 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.37,No.5 Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510142070
赵哈林,李瑾,周瑞莲,云建英,冯静,苏娜.不同强度净风频繁吹袭对樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)幼苗光合蒸腾特征的影响.生态学报,2017,37(5):1431-1437.
Zhao H L, Li J, Zhou R L, Yun J Y, Feng J, Su N. Effects of wind frequency on the rates of photosynthesis and transpiration in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings. Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1431-1437.

不同强度净风频繁吹袭对樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)幼苗光合蒸腾特征的影响

赵哈林[1,*],李 瑾[1],周瑞莲[2],云建英[1],冯 静[1],苏 娜[1]
1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000
2 鲁东大学生命学院,烟台 264025

摘要:为了解不同强度净风频繁吹袭对樟子松幼苗光合蒸腾特性的影响,2013 年春季在内蒙古科尔沁沙地研究了 0(对照)、6、9、12、15、18 m/s 等 6 个风速处理(分别相当于 0、4、5、6、7、8 级风)4 次吹袭下樟子松幼苗光合速率、蒸腾速率、水分利用效率等指标的变化。结果表明,净风频繁吹袭没有改变樟子松幼苗的光合速率和蒸腾速率的日变化规律,但可使其光合蒸腾 的“午休”时间加长、“休眠”程度加深;随着风吹强度的增加,其日均光合能力和蒸腾速率显著降低,其中 18 m/s 处理较对照分别下降 27.6%和 22.3%;随着风吹强度增加,气孔导度、胞间 CO_2浓度均先下降后回升,除 18 m/s 处理胞间 CO_2浓度显著高于 CK 外,其他处理均显著低于 CK;随着风吹强度增加,水分利用效率和光能利用效率均先增加后下降,其中除 18 m/s 处理的水分利用效率显著低于 CK,6 m/s 处理的光能利用效率高于 CK 外,其他处理的水分利用效率均高于 CK,光能利用效率均低于 CK;日均光合蒸腾速率的下降主要源于气孔导度的降低,而水分利用效率和光能利用效率的变化均受制于光合速率和蒸腾速率的变化。
关键词:樟子松幼苗;频繁风吹;光合特征;蒸腾速率;水分利用效率;光能利用效率

Effects of wind frequency on the rates of photosynthesis and transpiration in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings

ZHAO Halin[1,*], LI Jin[1], ZHOU Ruilian[2], YUN Jianying[1], FENG Jing[1], SU Na[1]
1 *Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*
2 *Faculty of Life Sciences*, *Ludong University*, *Yantai* 264025, *China*

Abstract: To understand the effects of frequent gusts of wind on the rates of photosynthesis and transpiration in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings, a field wind-blowing experiment using a wind speed gradient of 0 (CK), 6, 9, 12, 15, and 18 m/s and four episodes of wind blowing was conducted in the spring of 2013 in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia. The results showed that: 1) Frequent wind blowing did not change the diurnal variation in the rates of photosynthesis and transpiration in seedlings, but resulted in in an extension of midday depression and a higher degree of dormancy in photosynthesis and transpiration. 2) Increasing the wind strength led to a significant decrease in the average daily rates of photosynthesis and transpiration, with a decrease of 27.6% and 22.3% in the 18 m/s-treated seedlings compared to the CK, respectively. With an increase in wind strength, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentrations first increased and then decreased, and were significant lower in all treatment groups as compared with the CK group, with the exception of intercellular CO_2 concentration, which was higher in the 18 m/s group. 3) Increasing the

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31270752, 30972422)
收稿日期:2015-10-14; **网络出版日期**:2016-07-13
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: resdiv@ lzb.ac.cn

wind-sand flow strength led to a significant increase in water-use efficiency, except for a significant decrease in the 18 m/s treatment group as compared with the CK group. In addition, the efficiency of sunlight energy use tended to decrease except for a significant increase in the 6 m/s-treatment group as compared with the CK group. 4) Decreases in the average daily rates of photosynthesis and transpiration resulted from a decrease in stomatal conductance, and changes in water-use efficiency and sunlight energy-use efficiency resulted from changes in the rates of photosynthesis and transpiration.

Key Words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings; frequently wind blowing; photosynthetic properties; transpiration rate; water use efficiency; sunlight energy use efficiency

在陆地生态系统中,风作为一种重要的生态因子对植物的生长发育和繁殖有着重要的影响[1-2]。特别是在干旱半干旱地区,当风经过干燥疏松的沙质地表时常常形成风沙流,对植物的生存和分布造成严重影响[3]。近些年来,随着全球气候变暖,气候变化异常,大风和沙尘暴发生频率明显增大,风和风沙流对干旱半干旱生态系统的危害日趋严重[3-4],因而有关风和风沙流对植物影响及其适应研究的关注度正不断增加。

关于风对植物的影响及植物对风的适应性研究已有不少报道。目前,相关研究主要集中于风对植物表型结构、生长节律和生物量影响,以及植物对风吹的生理响应和综合适应等方面[1]。其中,有关风对植物光合作用影响的研究表明,风对植物光合作用和水分代谢的影响较为复杂[2,5]。研究表明,微风通常会增加植物叶片气孔内的气体交换速率,因而可以增加叶片的光合速率,但大风则会降低叶片的光合作用[5-6]。一般情况下,风会提高植物的蒸腾速率,但大风则会降低蒸腾速率[6-7]。例如,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等沙生植物在短期微风和劲风吹袭下其蒸腾速率和光合速率增加[8],高羊茅(*Festuca arundinacea*)在持续吹风后叶表面受损,蒸腾速率大大提高[1]。在短期风的作用下,叶片通过调节气孔的开合来调节蒸腾作用[8],在中期风作用下植物通过调整细胞渗透压来维持膨压,在长期风作用下植物通过调整总叶面积和叶片结构来适应环境[9-10]。但由于缺乏风吹试验的专用设备(风洞),过去大多数风吹试验都是采用人工晃动的模拟方法,无法正确反映风对植物及其环境的真实影响[2,11]。近年来随着野外风洞在相关研究领域中的应用,能够进行量化风吹强度和时间的风吹试验才得以开展[6-8]。但是,这种定量风速研究毕竟时间较短,有关不同风吹强度、时间、频率和风吹间隔时间对植物影响的研究报道还较少,有关不同植物对于风吹胁迫的光合蒸腾响应机制还不很清楚。

樟子松又名海拉尔松和蒙古赤松,天然分布于呼伦贝尔沙地及大兴安岭西侧山地[12]。由于具有较强的耐寒、耐旱和耐瘠薄能力,又是常绿树种,自 20 个世纪 50 年代以来已在我国北方沙区广泛引种和推广种植,为我国沙漠化防治和改善沙区生态环境起到了巨大作用[3,13]。开展樟子松幼树对不同强度净风频繁吹袭的光合生理响应研究,对于揭示其光合水分代谢对风沙环境的适应机制具有重要科学意义,也可为提高其进一步推广种植提供理论支撑。

1 研究材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗境内,地处科尔沁沙地腹地(42°55′—42°57′N, 120°41′—120°45′E,海拔 340—370 m)。该区属温带半干旱大陆性气候,年均降水量 356.9 mm,年均蒸发量 1900 mm,年均气温 6.5 ℃,≥10 ℃年积温 3190 ℃,无霜期 151 d;年平均风速 3.4 m/s,年平均扬沙天气 20—30 d。地貌以高低起伏的沙丘地和平缓草甸或农田交错分布为特征,土壤多为风沙土或沙质草甸土。研究区天然植物群落以中旱生植物为主,主要植物种有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、大果虫实(*Corispermum marocarpum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、小叶锦鸡儿等,樟子松作为人工林常绿树种在当地广泛种植。

1.2 试验设计

自然界的风多以阵风为主,具有短促频发特点。已有研究表明,取 10 min 作为研究阵风的时距已足有代

表性[5,9]。为此,本研究采用梯度风速试验设计,即试验包括 0(CK)、6、9、12、15、18 m/s 等 6 个风速处理(分别相当于无风、4、5、6、7、8 级风)。吹袭试验所用风洞为自制便携式风洞(专利号 ZL 200810182207X),其洞体长 6 m,试验截面 62 cm×62 cm,风速在 0—23 m/s 范围可调。试验地设置于地处科尔沁沙地腹地的中国科学院奈曼沙漠化研究站野外风洞试验场内,试验材料选用长势良好,高矮基本一致的 3 龄樟子松幼苗。在试验前一年(2012 年)秋季将其移栽至直径 21 cm,深 15 cm 的花盆中,通过适时适量浇水和冬季防冻等措施保证其安全越冬。试验于 2013 年 5 月下旬晴朗无风天气下进行,试验前测定其株高、基干直径等生物学特征,然后选择株高无显著差异植株作为试验材料。每个处理 6 个重复,每个重复为 1 株樟子松幼苗。风吹试验在野外风洞内进行,每次吹袭时间为 20 min,每次间隔 10 min,每个重复(即每棵植株)吹袭 4 次,风吹在清晨 6:00进行光合测定前 1 h 结束。最后一次风吹后即时取样测定叶片相对含水量,并于 6:00 开始利用Li-6400 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)测定其光合蒸腾等指标,每 2 h 测定 1 次,至 18:00 结束。考虑到风吹可能会造成其下部叶片脱落,测定时统一选取植株上部相邻叶片,每棵植株测定 4 个叶片。测定时,将叶片夹入叶室,待数据稳定后每片叶子读取 5 个数据,最后计算平均值。由于所测针叶呈半椭圆形,且长度大于 Li-6400 叶室长度,因而采用直接测定叶室内叶片两端直径后,计算其叶面积。水分利用效率为光合速率与蒸腾速率的比值,光能利用效率为光合速率与光合有效辐射的比值。

1.3　数据分析方法

应用 SPSS 13 软件进行数据的统计分析。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA) 和最小显著差异法(LSD) 比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相互关系。

2　结果和分析

2.1　光合速率日变化规律的比较

从图 1 可以看出,非风吹处理 CK 的光合速率日变化曲线为双峰曲线。其中,第 1 峰值出现在 10:00,第 2 峰值出现在 14:00,峰值间距 4 h。随着风吹强度的增加,其光合速率日变化曲线仍然为双峰曲线,但峰值大小和出现时间均有所改变。从 6 m/s 处理到 15 m/s 处理,其第 1 峰值均略有增加,第 2 峰值均有所下降,而 18 m/s 处理的第 1 峰值和第 2 峰值均明显下降。18 m/s 处理的第 1 峰值出现在早晨 6:00,第 2 峰值出现在 16:00,“午休”时间长达 8 h。和 CK 相比,“午休”期间光合速率最低值(谷值)依次下降了 5.1%、17.1%、33.4%、11.0%和 31.4%。

2.2　蒸腾速率日变化规律的比较

从图 2 可以看出,非风吹处理 CK 的蒸腾速率日变化曲线也为双峰曲线。其中,第 1 峰值出现在 10:00,第 2 峰值出现在 14:00,间隔 4 h。随着风吹强度的增加,其蒸腾速率曲线虽然仍表现为双峰曲线,但第 1 峰值提前到6:00—8:00,第2峰值在6 m/s和9 m/s处理为16:00,12 m/s、15 m/s和18 m/s处理为14:00。

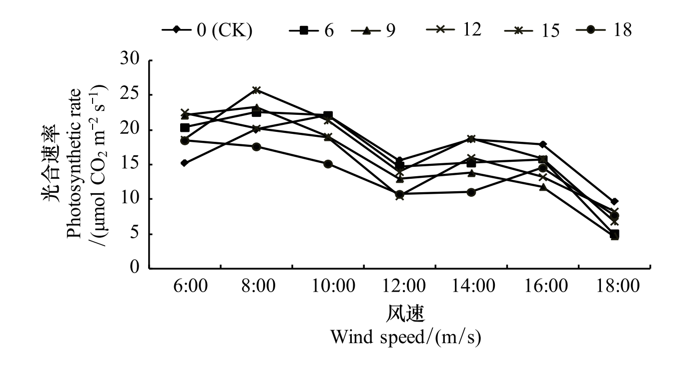


图 1　不同风速处理的光合速率日变化曲线

Fig. 1　Diurnal variation curves of photosynthetic rate at the different treatments

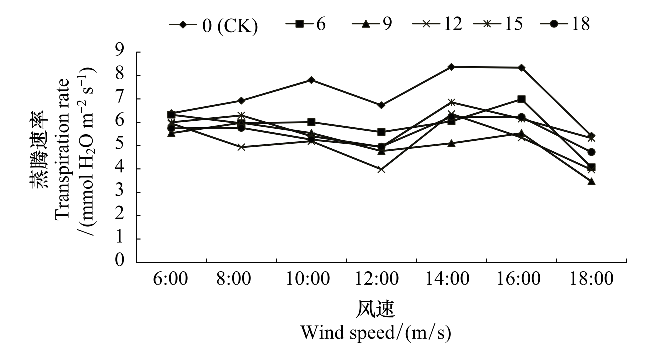


图 2　不同风速处理的蒸腾速率日变化曲线

Fig. 2　Diurnal variation curves of transpiration rate at the different treatments

和 CK 相比,各风吹处理的两个峰值均有所下降。其中第 1 峰值依次下降 19.0%、23.5%、23.8%%、23.2%和 26.4%,第 2 峰值分别下降了 16.5%、33.9%、24.0%、18.1%和 25.4%。而"午休"期间蒸腾速率谷值也趋于下降,依次较 CK 下降了 17.1%、29.3%、41.0%、26.6%和 26.%。

2.3 日均光合速率和蒸腾速率的比较

从图 3 可以看出,随着风吹强度的增加,樟子松幼苗的日均光合速率呈波动式下降。和 CK 相比,各处理日均光合速率依次下降 11.3%、17.7%、16.2%、7.3%和 27.6%,除 15 m/s 处理外,其他处理与 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$)。随着风吹强度的增加,樟子松幼苗的日均蒸腾速率也呈波动式下降。CK 相比,各处理日均蒸腾速率依次下降 18.1%、28.3%、28.6%、18.1%和 22.3%,且各风吹处理与 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$)。

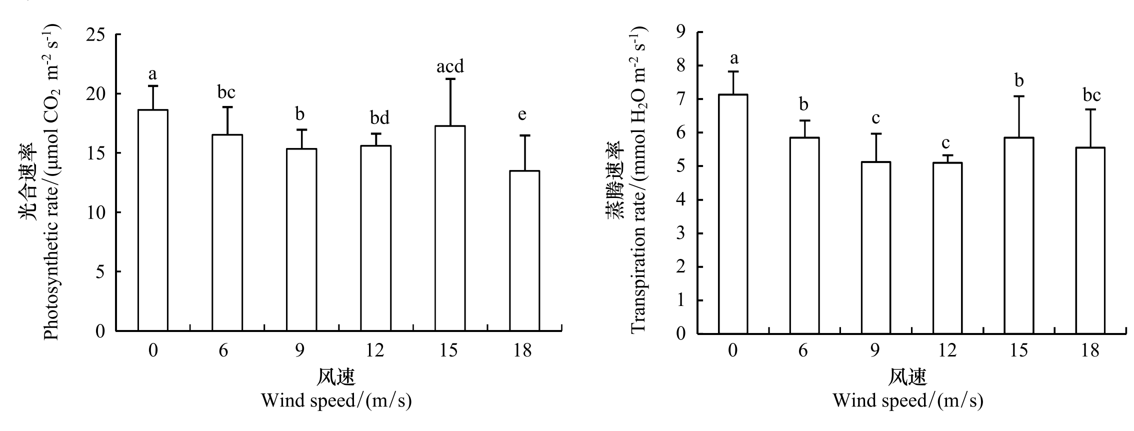


图 3 不同风速处理日均光合速率和蒸腾速率

Fig.3 Daily average photosynthetic rates and transpirations rate at the different treatments

2.4 日均气孔导度和胞间 CO_2浓度的比较

随着风吹强度的增加,樟子松幼苗日均气孔导度呈现波动式下降(图 4)。和 CK 相比,各风吹处理日均气孔导度依次下降了 18.2%、27.3%、27.3%、18.2%和 22.7%,且各风吹处理与 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$)。随着风吹强度增加,樟子松幼苗日均胞间 CO_2浓度呈现先下降再回升趋势。和 CK 相比,各风吹处理日均胞间 CO_2浓度依次下降了 3.7%、5.6%、7.1%、7.1%和+6.3%,且各风吹处理与 CK 的差异均达到显著水平($P<0.05$)。

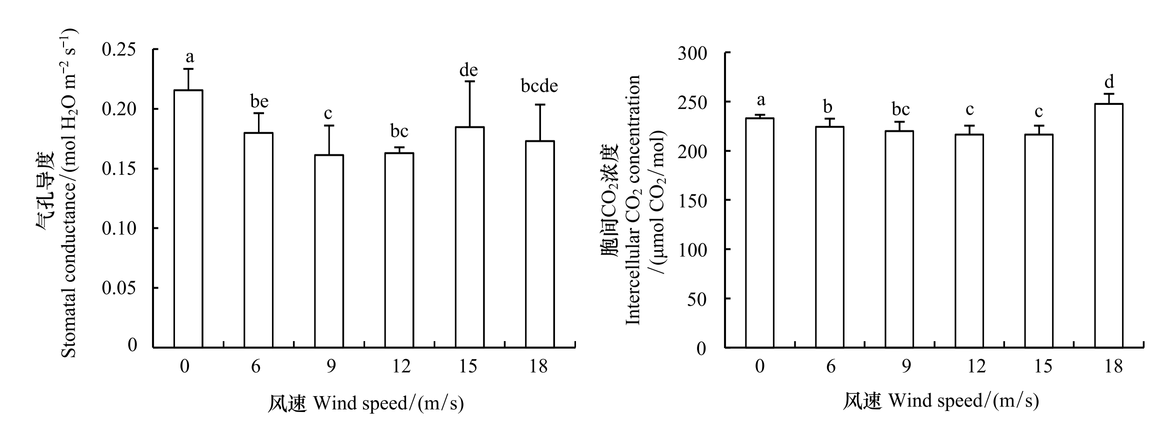


图 4 不同风速处理的气孔导度和胞间 CO_2 浓度

Fig.4 Daily average stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration

2.5 日均水分利用效率和光能利用效率比较

随着风吹强度的增加,樟子松幼苗的日均水分利用效率呈现先增加后下降趋势(图 5)。和 CK 相比,6—

15 m/s 处理的日均水分利用效率分别增加了 7.7%、15.3%、17.2%和 13.0%,而 18 m/s 处理的日均水分利用效率下降了 7.3%,各处理与 CK 的差异均达到了显著水平($P<0.05$)。随着风吹强度的增加,樟子松幼苗的日均光能利用效率也呈先增加后下降趋势(图 5)。和 CK 相比,6 m/s 处理的日均光能利用效率增加了 15.8%,而从 9 m/s 处理到 18 m/s 处理的日均光能利用率依次下降了 10.5%、15.8%、10.5%和 36.8%。

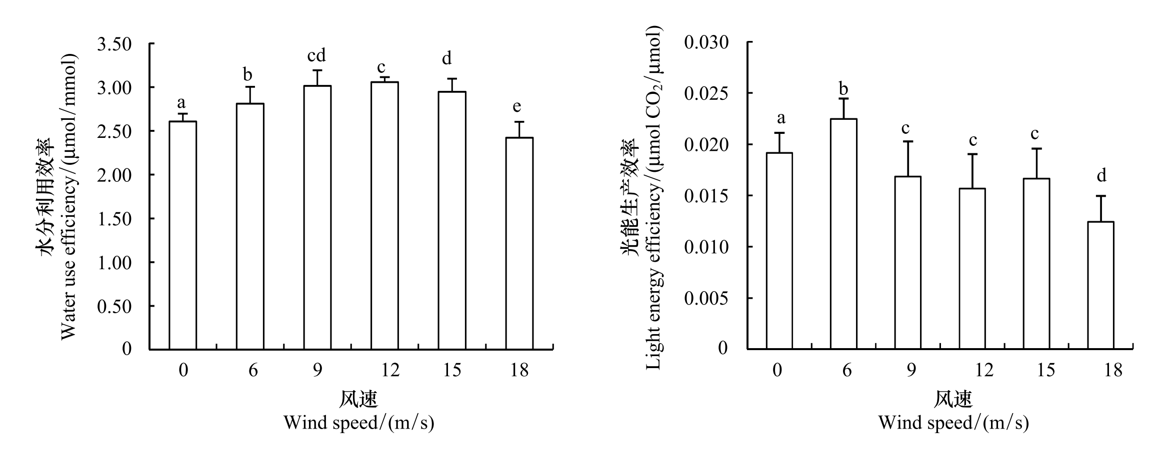


图 5　不同风速处理的水分利用效率和光能利用效率

Fig.5　Daily average WUE and sunlight energy use efficiency at the different treatments

2.6　不同指标之间的相互关系

相关分析(表 1)表明,光合速率的变化与蒸腾速率变化和气孔导度变化呈非常显著的正相关关系($P<0.01$),与胞间 CO_2 浓度呈不显著负相关,而蒸腾速率变化与气孔导度变化呈非常显著的正相关关系($P<0.01$)。水分利用效率与光合速率、蒸腾速率及气孔导度的相关性不显著,而与胞间 CO_2浓度呈非常显著的负相关关系($P<0.01$)。光能利用效率与光合速率呈非常显著的正相关关系($P<0.01$),与蒸腾速率和气孔导度呈显著正相关关系($P<0.05$),而与胞间 CO_2浓度呈不显著负相关。

表 1　不同指标间的相关系数

Table 1　Correlation coefficients among different indexes

参数 Parameters	光合速率 Photosynthetic rate	蒸腾速率 Transpiration rate *c*	气孔导度 Stomatal conductance	胞间 CO_2浓度 Intercellular CO_2 concentration	水分利用效率 Water use efficiency	光能利用效率 Light energy use efficiencyc
光合速率 Photosynthetic rate	1					
蒸腾速率 Transpiration rate	0.869**	1				
气孔导度 stomatal conductance c	0.872**	0.990**	1			
胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration	−0.345**	0.132	0.137	1		
水分利用效率 Water use efficiency	0.236*	−0.265*	−0.248*	−0.952**	1	
光能利用效率 Light energy use efficiencyc	0.615**	0.511**	0.489**	−0.334**	0.199	1

* 在 $P<0.05$ 水平上差异显著, ** 在 $P<0.01$ 水平上差异非常显

3　讨论

研究表明,非风吹 CK 的樟子松幼苗光合速率和蒸腾速率日变化曲线均为双峰曲线,这和吴春荣等[14]对 4 龄樟子松幼苗的研究结果一致。随着风吹胁迫的增强,樟子松幼苗的光合速率日变化曲线形状总体没有改变,仍然为双峰曲线,但两个峰值分别从 CK 的 10:00 和 14:00 最终变为 18 m/s 处理的 6:00 和 16:00,“午休”时间从 4h 增加到 8h,而且午休期间最低光合速率(谷值)也趋于下降,其中 18 m/s 处理较 CK 下降的 31.4%。同样,随着风吹胁迫的增强,蒸腾速率的日变化曲线形状也没有显著变化,但第 1 峰值由 10:00 前移

至 8:00,“午休”时间由 4 h 延长至 6 h,午休期间最低蒸腾速率也随风吹强度明显下降,最大下降幅度达 41.0%。这一方面说明,不同强度频繁的净风吹袭对于樟子松幼苗光合速率、蒸腾速率的日变化规律没有显著影响,风吹胁迫后其幼苗光合、蒸腾速率仍然遵循双峰曲线的变化规律;另一方面说明,频繁净风吹袭不仅可使光合蒸腾“午休”时间明显延长,而且使其“休眠”程度加大。这和频繁风沙流吹袭下樟子松幼苗光合蒸腾速率的日变化规律变化既有相同之处,又有很大不同。相同之处是,随着风沙流吹袭强度增加,樟子松幼苗的光合速率日变化规律也没有明显改变,午休时间也明显延长,不同之处是其蒸腾速率日变化曲线发生明显改变,且“午休”时间缩短[15]。这说明,频繁净风吹袭对樟子松幼苗的胁迫要小于频繁风沙流吹袭的胁迫。“午休”是植物为避免午间强光、高温、低湿伤害而形成的特殊保护机制[16-17],随着净风吹袭强度的增加,樟子松幼苗光合蒸腾“午休”时间的延长和“休眠”程度的加大,说明植物在净风频繁吹袭胁迫下,对午间强光、高温、低湿更为敏感,为了降低午间强光高温伤害和水分散失,不得不延长和加深了光呼吸和蒸腾耗水的抑制作用,这应该属于植物对于风吹的一种应激响应[18-19]。

随着风吹强度的增加,樟子松幼苗的日均光合速率和蒸腾速率均呈波动式下降。其中,18 m/s 处理的光合、蒸腾日均速率较 CK 分别下降了 27.6%和 22.3%,且绝大多数处理与 CK 的差异均达到显著水平。这和频繁风沙流吹袭下樟子松幼苗光合蒸腾日变化规律的反应也是既有相同之处,又有很大不同,即随着风沙流吹袭强度增加,樟子松幼苗的日均光合速率明显下降,而日均蒸腾速率明显增加[15]。这一方面说明,频繁净风吹袭可以显著改变樟子松幼苗的日均光合能力和蒸腾速率,导致其光合能力和蒸腾速率均明显降低;另一方面说明,净风和风沙流吹袭对樟子松幼苗日均蒸腾速率的影响存在较大差异,频繁净风吹袭对樟子松幼苗日均蒸腾作用的影响要小于频繁风沙流吹袭。气孔是植物进行 CO_2 和水汽交换的通道, 气孔张闭程度的变化同时控制着叶片的光合与蒸腾速率[20]。随着风吹强度增加,樟子松幼苗气孔导度和胞间 CO_2 浓度也都呈下降趋势,其光合蒸腾速率的变化与气孔导度呈极显著正相关,而光合速率与胞间 CO_2 浓度呈极显著负相关。这说明,随着净风吹袭强度增加,樟子松幼苗气孔导度的下降,气孔阻力的增加,是导致其光合蒸腾速率下降的主要原因[20-21],而光合速率的增加或降低是导致其胞间 CO_2 浓度降低或增加的主要机制[21]。

研究表明,从 6 m/s 处理到 15 m/s 处理,樟子松幼苗的日均水分利用效率趋于增加,只在 18 m/s 处理显著下降。光能利用率仅在 6 m/s 处理明显增加,其他处理均随风吹强度增加而显著下降。这一方面说明,一定强度的净风吹袭,有利于樟子松幼苗水分利用效率的提高,而 8 级大风的吹袭则会导致其水分利用效率下降;另一方面说明,低风速(4 级风)净风吹袭有利于提高其光能利用率,而 5 级及其以上净风吹袭则会降低其光能利用率降低。在我国,樟子松主要种植于干旱半干旱风沙区,水资源不足是该区制约植物生长的主要因素之一[19,22],一定强度的净风吹袭致使植物蒸腾速率降低,水分利用效率提高,显然有利于提高干旱半干旱地区水资源的高效利用[3,20]。虽然随着吹袭强度增加,樟子松幼苗的光合速率和光能利用效率下降,但光能资源并不是干旱半干旱地区植物生长的限制因素[9-10],因而其光能利用效率的降低并不影响其生存和繁衍,只能抑制其生物产量的提高,这也可能是其生长缓慢的重要原因之一[13-14,23]。

4 结论

综合以上对于研究结果的分析和讨论,得到以下几点结论:1)净风的频繁吹袭没有改变樟子松幼苗的光合速率和蒸腾速率的日变化规律,但可使其光合蒸腾的“午休”时间加长,“休眠”程度加深;2)随着风吹强度的增加,其日均光合能力降低,蒸腾速率下降,气孔导度、胞间 CO_2 浓度波动式下降;3)随着风吹强度的增加,其水分利用效率趋于增加,但 8 级大风吹袭下其水分利用效率下降;4)6 m/s 的净风吹袭有利于提高樟子松幼苗的光能利用效率,而 6 m/s 以上频繁净风吹袭则可导致樟子松幼苗光能效率下降;5)日均光合能力和蒸腾速率的下降主要源于气孔导度的降低和气孔阻力的增加,而光合速率的下降是其光能利用效率的降低的主要原因。

参考文献(References):

[1] 张琳琳, 赵晓英, 原慧. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1349-1353.
[2] 王艳红, 何维明, 于飞海, 江洪, 余树全, 董鸣. 植物响应对风致机械刺激研究进展. 生态学报, 2010, 30(3): 794-800.
[3] 赵哈林, 李瑾, 周瑞莲, 曲浩, 云建英, 潘成臣. 玉米幼苗对风沙流强度变化的生理响应. 应用生态学报, 2015, 26(1): 61-66.
[4] Hughes L. Climate change and Australia: trends, projections and impacts. Austral Ecology, 2003, 28(4): 423-443.
[5] Grace J. Plant Response to Wind. California: Academic Press, 1977.
[6] 唐霞, 崔建垣, 曲浩, 李熙萌. 风对科尔沁地区几种常见作物幼苗光合、蒸腾特性的影响. 生态学杂志, 2011, 30(3): 471-476.
[7] 曲浩, 赵学勇, 岳广阳, 王少昆. 科尔沁沙地几种常见植物对风胁迫的生理响应. 中国沙漠, 2009, 29(4): 668-673.
[8] 赵哈林, 何玉惠, 岳广阳, 周瑞莲. 风吹、沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响. 生态学杂志, 2010, 29(3): 413-419.
[9] Coutts M P, Grace J. Wind and Trees. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
[10] Onoda Y, Anten N P R. Challenges to understand plant responses to wind. Plant Signaling & Behavior, 2011, 6(7): 1057-1059.
[11] Anten N P R, Alcalá-Herrera R, Schieving F, Onoda Y. Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major*. New Phytologist, 2010, 188(2): 554-564.
[12] 赵兴梁, 李万英. 樟子松. 北京: 农业出版社, 1963.
[13] 李宏印, 刘明国. 樟子松人工固沙林发展现状. 辽宁林业科技, 2003, (5): 35-36, 39-39.
[14] 吴春荣, 金红喜, 严子柱, 满多清, 马全林, 安富博. 樟子松在西北干旱沙区的光合日变化特征. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 144-146.
[15] 赵哈林, 李瑾, 周瑞莲, 云建英, 曲浩, 潘成臣. 风沙流频繁吹袭对樟子松幼苗光合水分代谢的影响. 草业学报, 2015, 24(10): 149-156.
[16] Vogel S. Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape. New Phytologist, 2009, 183(1): 13-26.
[17] Vogel S. Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. Journal of Experimental Botany, 1989, 40(8): 941-948.
[18] Grace J. Plant response to wind. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1988, 22-23: 71-88.
[19] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 刘家琼. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响. 植物生态学报, 2003, 27(1): 53-58.
[20] 赵文智, 常学礼. 樟子松针叶气孔运动与蒸腾强度关系研究. 中国沙漠, 1995, 15(3): 241-243.
[21] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO_2 浓度关系的思考. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 64-66.
[22] Bosabalidis A M, Kofidis G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. Plant Science, 2002, 163(2): 375-379.
[23] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 刘家琼. 风沙流对植物生长影响的研究. 地球科学进展, 2002, 17(2): 262-267.